



Evaluasi Kinerja dan Efisiensi Generator Sebelum dan Sesudah *Overhaul* pada PLTP Unit 1 PT. XYZ

Evaluation of Generator Performance and Efficiency Before and After Overhaul at Unit 1 Geothermal Power Plant of PT. XYZ

Putty Yunesti^{1,a)}, Muhammad Ari Fathullah¹, Setiadi Wira Buana¹, Wulan Kusuma Wardani¹, Ririn Andriyani², Muhammad Rizky Zen¹, Guna Bangun Persada¹, Farisan Robbani¹, Isra Nuur Darmawan³

¹Teknik Sistem Energi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera

²Sains Atmosfer dan Keplanetan, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sumatera

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Wijayakusuma Purwokerto

^{a)}Corresponding author: putty.yunesti@tse.itera.ac.id

Abstrak

Kinerja generator pada PLTP Unit 1 PT. XYZ mengalami beberapa kendala operasional seperti *derating*, penghentian unit, dan keterlambatan perawatan yang dapat menurunkan efisiensi pembangkitan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi generator sebelum dan sesudah *overhaul* serta menganalisis perubahan kinerja generator berdasarkan parameter operasional dan termodinamika. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan data operasional generator dan sistem uap yang dikumpulkan selama 14 hari sebelum dan sesudah *overhaul*. Parameter yang dianalisis meliputi daya generator, faktor daya, tekanan uap, laju aliran massa uap, entalpi, dan entropi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebelum *overhaul* daya rata-rata generator sebesar 46,36 MW dengan efisiensi rata-rata 89%, sedangkan setelah *overhaul* meningkat menjadi 50,38 MW dengan efisiensi rata-rata 96%. Peningkatan efisiensi menunjukkan bahwa proses *overhaul* berkontribusi terhadap perbaikan kinerja generator dan sistem pembangkitan secara keseluruhan.

Kata Kunci: efisiensi generator; panas bumi; turbin

Abstract

Generator performance at PLTP Unit 1 of PT. XYZ has experienced several operational issues, such as *derating*, unit shutdowns, and maintenance delays, which can reduce power generation efficiency. This study aims to evaluate generator efficiency before and after *overhaul* and to analyze changes in generator performance based on operational and thermodynamic parameters. The research employed a descriptive quantitative approach using operational data from the generator and steam system collected over 14 days before and after the *overhaul*. The parameters analyzed included generator power output, power factor, steam pressure, steam mass flow rate, enthalpy, and entropy. The results showed that before the *overhaul*, the generator had an average power output of 46.36 MW with an average efficiency of 89%, while after the *overhaul*, the average power output increased to 50.38 MW with an average efficiency of 96%. The improvement in efficiency indicates that the *overhaul* process contributed significantly to enhancing generator performance and the overall power generation system.

Keywords: generator efficiency; geothermal; turbine

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) menghasilkan listrik dengan memanfaatkan uap bersuhu tinggi dan bertekanan tinggi dari energi panas bumi untuk menggerakkan turbin [1]. Sekitar 40% cadangan panas bumi dunia berada di Indonesia [2], dengan sebagian besar tersebar di wilayah barat Indonesia, termasuk Sumatera, Jawa, dan Bali. Wilayah-wilayah ini merupakan lokasi sebagian besar cadangan panas bumi Indonesia.

Pada Indonesia terdapat 16 wilayah kerja panas bumi dengan 18 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi yang saat ini beroperasi. Total kapasitas pembangkit panas bumi yang dikelola oleh Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE) adalah sebesar 2.638,8 MW [3]. Capaian ini menjadikan Indonesia sebagai produsen listrik panas bumi terbesar kedua di dunia, setelah Amerika Serikat, mengungguli Filipina yang sebelumnya berada di posisi kedua [4] namun, pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia masih tergolong rendah, yaitu baru sekitar 11% dari total potensi yang dimanfaatkan [5]. Selain itu, pengembangan pemanfaatan energi panas bumi berlangsung cukup lambat, dengan rata-rata peningkatan tahunan hanya sebesar 7% antara tahun 2016 hingga [6].

Pemanfaatan energi panas bumi secara optimal sejalan dengan transisi energi bersih dan ramah lingkungan yang dicanangkan oleh Pemerintah Indonesia. Dalam mendukung inisiatif ini, evaluasi kinerja yang komprehensif sangat penting dilakukan terhadap unit pembangkit listrik tenaga panas bumi, khususnya pada generator yang berperan sebagai komponen utama dalam proses pembangkitan listrik.

Studi ini secara khusus mengkaji PLTP milik PT. XYZ yang beroperasi dengan total kapasitas sebesar 110 MW. PLTP PT.XYZ terdiri dari dua unit: PLTP Unit 1 dan PLTP Unit 2. Kondisi operasional PLTP Unit 1, yang terhubung ke jaringan listrik, dapat menyebabkan permasalahan kinerja yang menghambat pembangkit untuk beroperasi pada kapasitas penuh. Generator yang beroperasi di bawah performa optimal dapat menyebabkan penurunan efisiensi sistem kelistrikan secara keseluruhan [7]. Penurunan kinerja ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti kegagalan operasional, *trip* (penghentian unit), keterlambatan perawatan, serta lambatnya penerapan pengurangan beban (*derating*) [8].

Solusi untuk mengatasi tantangan tersebut dan memastikan kinerja generator yang stabil adalah melalui proses *overhaul* sebagai bentuk perawatan menyeluruh dan terjadwal. Proses *overhaul* mencakup pembongkaran, inspeksi, pembersihan, perbaikan, serta penggantian komponen generator dan sistem pendukung yang mengalami penurunan performa atau kerusakan dengan tujuan mengembalikan kondisi operasi mendekati

spesifikasi desain awal [9], [10]. Pada sistem PLTP, penurunan efisiensi umumnya dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis, seperti penumpukan kerak pada *nozzle* dan sudu turbin akibat kandungan mineral dalam uap panas bumi, degradasi isolasi generator akibat temperatur operasi yang tinggi, keausan bantalan rotor, serta penurunan transfer energi, meningkatnya rugi-rugi mekanis dan listrik, serta terjadinya *derating* pada unit pembangkit [11]. Oleh karena itu, *overhaul* menjadi langkah penting untuk memulihkan performa turbin-generator dan meningkatkan efisiensi sistem pembangkitan secara keseluruhan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi generator pada PLTP Unit 1 PT. XYZ melalui perbandingan kondisi sebelum dan sesudah *overhaul*, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi perubahan kinerja generator berdasarkan parameter operasional dan termodinamika. Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada evaluasi parsial sistem pembangkit, seperti performa turbin, *cooling tower*, atau konsumsi energi, sedangkan kajian yang secara khusus menganalisis perubahan efisiensi generator PLTP sebelum dan sesudah *overhaul* dengan pendekatan termodinamika masih terbatas. Selain itu, hubungan antara parameter uap, entalpi, entropi, dan efisiensi aktual generator pada sistem PLTP belum banyak dibahas secara terintegrasi.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan analisis komprehensif terhadap efisiensi generator menggunakan kombinasi parameter operasional generator dan parameter termodinamika uap untuk mengevaluasi dampak *overhaul* pada sistem pembangkitan panas bumi. Penelitian ini juga memberikan kontribusi ilmiah berupa data empiris mengenai perubahan efisiensi aktual generator setelah *overhaul* serta identifikasi faktor-faktor teknis yang memengaruhi peningkatan performa sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan strategi pemeliharaan, optimasi efisiensi pembangkit listrik tenaga panas bumi, dan peningkatan keandalan operasional PLTP di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di PLTP PT. XYZ, khususnya pada Unit 1. Uap panas bumi dihasilkan melalui proses *flashing* oleh PT XYZ, kemudian disalurkan ke PLTP Unit 1 dan Unit 2 dengan tekanan 8 bar dan suhu 170°C. Uap panas bumi yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan turbin uap di PLTP Unit 1.

Turbin merupakan komponen utama dalam sistem pembangkitan listrik, yang berfungsi mengubah energi termal dari uap menjadi energi mekanik [12], [13]. Energi mekanik yang dihasilkan dari putaran turbin kemudian diteruskan ke generator untuk diubah menjadi energi listrik [14]. Spesifikasi teknis dari turbin dan generator yang digunakan di PLTP Tanggamus Unit 1 disajikan dalam

Tabel 1 dan **Tabel 2** Energi mekanik yang dihasilkan dari putaran turbin kemudian diteruskan ke generator untuk diubah menjadi energi listrik [15]. Penelitian ini dilakukan selama 14 hari berturut-turut, baik sebelum maupun sesudah *overhaul*. Selama proses pengumpulan data, akuisisi informasi dilakukan dengan pendekatan kuantitatif.

Tabel 1. Spesifikasi Turbin

Type	Single cylinder double flow condensing type
Rated output	55 MW
Rated Speed	3000 RPM
Inlet Steam Pressure	7,6 RPM
Inlet Steam Temperature	168,3 °C
Exhaust Pressure	0,1 bar
Direction of rotation	Clockwise (view from generator side)
Number of blade stages	11 × 2 flow
Last stage balde length	696,8 mm
Main Steam Stop Valves	2 × Ø 650
Main Steam Control Valves	2 × Ø 650
Exhaust Connection to condenser (internal)	2 × (2150 mm × 5100 mm)

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode evaluasi komparatif untuk menganalisis perubahan efisiensi generator sebelum dan sesudah *overhaul* pada PLTP Unit 1 PT. XYZ. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari lembar log operasional generator dan sistem uap pada kondisi operasi stabil.

Pengumpulan data dilakukan selama tujuh hari berturut-turut untuk masing-masing kondisi, yaitu sebelum dan sesudah *overhaul*. Data operasional generator yang dikumpulkan meliputi daya keluaran (P), faktor daya (Pf), arus listrik (A), frekuensi (f), dan tegangan (V), sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 3**. Selain itu, data parameter termodinamika sistem uap meliputi tekanan uap masuk, tekanan uap keluar, dan laju aliran massa uap yang disajikan pada **Tabel 4**.

Spesifikasi generator Unit 1 yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 2**. Generator memiliki tipe GTLRI504/60-2 dengan kapasitas daya terpasang sebesar 55 MW dan kecepatan putar 3000 RPM. Tegangan nominal generator sebesar 11.000 V dengan arus nominal 3674 A dan frekuensi operasi 50 Hz.

Tabel 2. Spesifikasi Generator Unit 1

Type	GTLRI504/60-2
Rated output	55 MW
Rated Speed	3000 RPM
Tegangan	11.000 V
Arus	3674 A
Phase	3 Phase
Frekuensi	50 Hz
Resistansi Stator	0,00305 ohm
Resistansi Rotor	0,174 ohm
Efisiensi Desain Generator	98,4%

Data yang diperoleh kemudian diolah untuk menghitung parameter termodinamika dan efisiensi generator menggunakan pendekatan analisis termodinamika. Perhitungan dilakukan berdasarkan parameter tekanan uap, laju aliran massa, entalpi, dan entropi untuk memperoleh daya turbin isentropik serta daya aktual generator. Selanjutnya, nilai efisiensi generator sebelum dan sesudah *overhaul* dibandingkan untuk mengevaluasi pengaruh *overhaul* terhadap peningkatan kinerja sistem pembangkitan secara keseluruhan.

Tabel 4 menyajikan perubahan tekanan uap masuk dan keluar serta laju aliran massa uap sebelum dan sesudah *overhaul*. Terdapat peningkatan tekanan uap masuk dari kisaran 6.114 hingga 6.218 bar menjadi 6.245 hingga 6.330 bar. Tekanan keluar juga sedikit meningkat, sementara laju aliran massa menunjukkan tren yang relatif stabil namun sedikit membaik, yang menunjukkan efisiensi sistem termal meningkat.

Dalam konteks termodinamika, entalpi (H) merupakan parameter yang merepresentasikan total energi dalam suatu sistem, termasuk energi internal sistem dan hasil perkalian antara tekanan gas dalam sistem dengan volumenya [16]. Praktiknya, nilai absolut dari entalpi tidak dapat diukur secara langsung; yang dapat diketahui hanyalah perubahan entalpi (ΔH), mirip seperti yang terjadi dalam sistem mekanika klasik. Pada sisi lain, entropi (S) merepresentasikan tingkat ke tidak ter aturan atau ke acakan dalam suatu sistem, yang berhubungan langsung dengan efisiensi dan ketak ter balikan suatu proses termal [17]. Perubahan entropi (ΔS) menjadi sangat penting dalam mengevaluasi efisiensi proses-proses termodinamika. Menurut hukum kedua termodinamika, entropi dalam suatu sistem tertutup cenderung meningkat selama proses alami, terutama saat panas berpindah dari fluida bersuhu tinggi ke fluida bersuhu rendah [18]. Kedua parameter ini memainkan peran penting dalam memahami kinerja siklus

termodinamika pada sistem pembangkit tenaga, khususnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).

Tabel 3. Data Rata-Rata Beban Generator Sebelum dan Sesudah *Overhaul* (14 November 2023 sampai 02 Januari 2024)

Data	Hari Ke-	P	Pf	A	f	V
Sebelum <i>Overhaul</i>	1	45.64	0.986	2532.41	50	156,45
	2	46.38	0.990	2523.083	50	156,85
	3	46.18	0.986	2525.25	50	157,81
	4	46.52	0.908	2521.16	50	155,55
	5	46.74	0.985	2530.58	50	156,03
	6	46.76	0.989	2518.16	50	156,45
	7	46.28	0.994	2508.41	50	157,50
Sesudah <i>Overhaul</i>	1	50.38	0.992	2563	50	158,583
	2	50.82	0.993	2610	50	158.341
	3	50.38	0.996	2540	50	157,908
	4	50.37	0.993	2533	50	158
	5	50.31	0.996	2536	50	157,6
	6	50.22	0.996	2541	50	157,616
	7	50.23	0.993	2601	50	158,516

Tabel 4. Data Rata-Rata Tekanan Uap dan Laju Aliran Massa Sebelum dan Sesudah *Overhaul* (14 November 2023 sampai 02 Januari 2024)

Data	Hari ke-	Tekanan Masuk (bar)	Tekanan Keluar (bar)	Laju Aliran Massa (kg/h)
Sebelum <i>Overhaul</i>	1	6.165	0.0554	303.415
	2	6.154	0.0554	303.762
	3	6.215	0.0547	304.012
	4	6.183	0.0553	300.897
	5	6.165	0.055	303.679
	6	6.218	0.054	301.842
	7	6.114	0.0554	299.317
Sesudah <i>Overhaul</i>	1	6.275	0.0609	305.372
	2	6.245	0.062	310.468
	3	6.276	0.0605	303.037
	4	6.275	0.0604	301.925
	5	6.290	0.0602	302.757
	6	6.312	0.0603	303.067
	7	6.330	0.0607	302.598

Dalam penelitian ini, nilai entalpi dan entropi uap kerja diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak *Chemical TowerSteamTab Companion*. Perangkat lunak ini menyediakan data sifat termodinamika uap berdasarkan tabel uap jenuh dan melakukan perhitungan *interpolatif* secara otomatis untuk menentukan nilai-nilai di antara dua titik data yang tersedia. Dengan demikian, perhitungan entalpi dan entropi dapat dilakukan dengan lebih cepat dan akurat, terutama ketika tekanan atau suhu uap tidak secara tepat sesuai dengan data yang terdapat dalam Tabel 4.

1. Kualitas Uap (x)

Kualitas uap, yang juga dikenal sebagai fraksi uap (x), menggambarkan proporsi fase uap dalam campuran dua fase (uap dan cair) pada keluaran turbin [19]. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan nilai entropi dari uap masuk dan entropi campuran jenuh antara cair dan uap [16]:

$$x = \frac{S_1 - S_f}{S_g - S_f} \quad (1)$$

Keterangan:

S_1 : entropi berdasarkan tekanan uap masuk ke turbin (kJ/kg·K).

S_f : entropi cair jenuh berdasarkan tekanan uap keluar dari turbin (kJ/kg·K).

S_g : entropi uap jenuh berdasarkan tekanan uap keluar dari turbin (kJ/kg·K).

Interpretasi Nilai x :

a) Jika $x = 1$, ini menunjukkan bahwa uap sepenuhnya berada dalam keadaan uap jenuh.

b) Jika $x < 1$, uap keluar dalam bentuk campuran antara uap dan cairan (uap basah).

Nilai x yang lebih rendah menunjukkan kualitas uap yang lebih rendah, yang dapat berdampak pada efisiensi turbin maupun generator [16].

2. Entalpi Keluar Turbin dalam Kondisi Isentropik (h_{2s})

Entalpi uap yang keluar dari turbin dalam kondisi isentropik (h_{2s}) merepresentasikan total energi yang dibawa oleh uap setelah mengalami ekspansi isentropik di dalam turbin [19]. Parameter ini sangat penting untuk mengevaluasi proses konversi energi ideal dalam turbin. Entalpi dalam kondisi isentropik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [16]:

$$h_{2s} = h_f + x(h_g - h_f) \quad (2.2)$$

Keterangan:

h_f : entalpi cair jenuh berdasarkan tekanan uap keluar dari turbin (kJ/kg)

h_g : entalpi uap jenuh berdasarkan tekanan uap keluar dari turbin (kJ/kg)
 x : kualitas uap (fraksi uap) yang dihitung dari data entropi

3. Daya Turbin Isentropik (P_s)

Daya turbin isentropik merupakan daya teoritis yang dihasilkan apabila proses ekspansi berlangsung tanpa kehilangan energi (proses ideal) [19]. Nilai ini dihitung berdasarkan perubahan entalpi antara kondisi masuk dan keluar turbin, serta laju aliran massa uap ($\dot{m}$) dengan menggunakan persamaan berikut [16]:

$$P_s = \dot{m} (h_1 - h_{2s}) \quad (3)$$

Keterangan:

$\dot{m}$: laju aliran massa uap (kg/jam).

h_1 : entalpi uap pada sisi masuk turbin (kJ/kg).

h_{2s} : entalpi uap pada sisi keluar turbin dalam kondisi isentropik (kJ/kg).

4. Daya Masuk Generator (P_{in})

Daya masuk generator (P_{in}) merefleksikan energi yang tersedia untuk dikonversi menjadi energi listrik oleh generator [19]. Parameter ini dihitung dengan mengalikan daya isentropik turbin dengan efisiensi aktual turbin (η_{turbin}) menggunakan persamaan berikut [16]:

$$P_{in} = P_s \times \eta_{turbin} \quad (4)$$

Keterangan:

P_{in} : daya input ke generator (kW).

η_{turbin} : efisiensi aktual turbin (tanpa satuan, nilai antara 0 dan 1).

P_s : daya turbin isentropik (kW), yaitu daya teoritis yang dihasilkan jika proses ekspansi berlangsung tanpa kehilangan energi.

5. Efisiensi Generator (η_{gen})

Efisiensi generator (η_{gen}) menunjukkan seberapa efektif energi input dikonversi menjadi energi listrik keluaran [19]. Nilai efisiensi yang rendah dapat mengindikasikan adanya kehilangan energi dalam bentuk panas, gesekan, atau bentuk kehilangan konversi lainnya. Efisiensi dihitung dengan persamaan berikut [16]:

$$\eta_{gen} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan

η_{gen} : efisiensi generator (%)

P_{out} : daya listrik aktual yang dihasilkan atau beban output (MW)

P_{in} : daya input ke generator dari turbin (MW)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan nilai entalpi dan entropi uap yang masuk ke turbin sebelum dan sesudah proses *overhaul* disajikan pada Tabel 5. Rata-rata nilai entalpi uap yang masuk ke turbin sebelum *overhaul* berada pada kisaran 2756,957 kJ/kg hingga 2757,685 kJ/kg, sedangkan setelah *overhaul* nilainya meningkat menjadi 2757,794 kJ/kg hingga 2758,464 kJ/kg. Kenaikan nilai entalpi ini menunjukkan bahwa uap yang masuk ke turbin membawa energi termal yang lebih besar, yang secara teoritis dapat meningkatkan output daya mekanik turbin. Hal ini mengindikasikan adanya perbaikan dalam kondisi termal sistem setelah dilakukan pemeliharaan menyeluruh.

Pada sisi lain, nilai entropi uap yang masuk ke turbin sebelum *overhaul* tercatat berada pada kisaran 6,747 kJ/kg·K hingga 6,753 kJ/kg·K, dan setelah *overhaul* mengalami penurunan ke kisaran 6,741 kJ/kg·K hingga 6,746 kJ/kg·K. Penurunan nilai entropi ini menunjukkan berkurangnya tingkat ketidakteraturan energi dalam sistem, yang mengindikasikan bahwa sistem termodinamika bekerja dalam kondisi yang lebih efisien dan lebih mendekati proses reversibel. Kondisi ini sangat diharapkan dalam sistem pembangkitan karena membantu meminimalkan kerugian entropi atau irreversibilitas proses, sehingga meningkatkan efisiensi termal keseluruhan.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Entalpi dan Entropi Dari Tekanan Uap Masuk Turbin Sebelum Dan Sesudah Overhaul (14 November 2023 sampai 02 Januari 2024)

Data	Hari ke-	Entalpi Uap (kJ/kg)	Entropi Uap (kJ/kg.K)	Entalpi Cair (kJ/kg)	Entropi Cair (kJ/kg.K)
Sebelum Overhaul	1	2757.316	6.750	674.999	1.941
	2	2757.152	6.751	674.705	1.941
	3	2757.661	6.747	676.384	1.945
	4	2757.443	6.749	675.498	1.943
	5	2757.313	6.750	674.981	1.941
	6	2757.685	6.747	676.453	1.945
	7	2756.957	6.753	673.603	1.938
Sesudah Overhaul	1	2758.003	6.744	678.034	1.948
	2	2757.794	6.746	677.209	1.947
	3	2758.093	6.744	678.060	1.949
	4	2757.996	6.744	678.010	1.948
	5	2758.023	6.743	678.446	1.949
	6	2758.338	6.742	679.035	1.951
	7	2758.464	6.741	679.534	1.952

Tabel 6 menyajikan hasil perhitungan nilai entalpi dan entropi uap pada sisi keluar turbin, baik sebelum maupun sesudah dilakukan proses *overhaul*. Sebelum *overhaul*, nilai entalpi uap keluar masih berada pada kisaran 2757,794 kJ/kg hingga 2758,464 kJ/kg, dengan entropi uap antara 6,741 kJ/kg·K hingga 6,746 kJ/kg·K. Nilai entalpi dan entropi keluar yang masih mendekati kondisi uap masuk mengindikasikan bahwa proses ekspansi uap di dalam turbin belum berlangsung secara optimal. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemanfaatan energi termal uap untuk menghasilkan energi mekanik masih mengalami penurunan performa dibandingkan kondisi ideal operasi turbin. Secara teknis, kondisi tersebut mengindikasikan dipengaruhi oleh penurunan performa turbin akibat *scaling* pada *nozzle* dan sudu turbin, *losses* mekanis, serta distribusi aliran uap yang kurang optimal sebelum *overhaul*.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Entalpi dan Entropi dari Tekanan Uap yang Keluar dari Turbin Sebelum dan Sesudah Overhaul (14 November 2023 sampai 02 Januari 2024)

Data	Hari ke-	Entalpi Uap (kJ/kg)	Entropi Uap (kJ/kg.K)	Entalpi Cair (kJ/kg)	Entropi Cair (kJ/kg.K)
Sebelum Overhaul	1	2758.003	6.744	678.034	1.948
	2	2757.794	6.746	677.209	1.947
	3	2758.093	6.744	678.060	1.949
	4	2757.996	6.744	678.010	1.948
	5	2758.023	6.743	678.446	1.949
	6	2758.338	6.742	679.035	1.951
	7	2758.464	6.741	679.534	1.952
Sesudah Overhaul	1	2564.028	8.357	145.424	0.501
	2	2564.042	8.357	145.450	0.501
	3	2563.637	8.362	144.512	0.498
	4	2563.243	8.366	143.600	0.495
	5	2563.943	8.358	145.222	0.501
	6	2563.798	8.360	144.882	0.499
	7	2563.698	8.361	144.652	0.499

Nilai entalpi uap keluar menurun drastis menjadi kisaran 2563,243 kJ/kg hingga 2564,042 kJ/kg. Penurunan ini menunjukkan bahwa lebih banyak energi dari uap telah berhasil dikonversi menjadi kerja mekanik oleh turbin, yang menandakan peningkatan kinerja sistem, sebaliknya, nilai entropi meningkat ke kisaran 8,357 kJ/kg·K hingga 8,366 kJ/kg·K, yang merupakan konsekuensi alami dari proses ekspansi uap. Peningkatan entropi ini mencerminkan bertambahnya tingkat tidak teraturan sistem akibat transfer energi, tetapi tetap berada dalam rentang yang menunjukkan kinerja termodinamika yang efisien. Secara keseluruhan, perbedaan entalpi dan entropi

sebelum dan sesudah *overhaul* memberikan indikasi kuat bahwa proses ekspansi uap di dalam turbin menjadi lebih efektif setelah pemeliharaan menyeluruh dilakukan. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi konversi energi termal menjadi energi mekanik, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik oleh generator.

Selain itu, **Tabel 6** juga mencantumkan parameter tambahan yang digunakan dalam perhitungan efisiensi aktual sistem, yang dihitung berdasarkan pendekatan termodinamika. Parameter tersebut mencakup entalpi keluaran teoritis dalam kondisi isentropik (h_{2s}), daya turbin isentropik (P_s), daya aktual *input* ke generator (P_{in}). Nilai-nilai tersebut digunakan untuk mengevaluasi efisiensi termal sistem secara keseluruhan, dan membandingkan efisiensi aktual terhadap efisiensi ideal. Melalui pendekatan ini, dapat dilakukan analisis kuantitatif mengenai efektivitas proses konversi energi termal uap menjadi energi mekanik pada turbin dan selanjutnya menjadi energi listrik pada generator. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sebelum *overhaul*, proses ekspansi uap masih mengalami penurunan efektivitas, yang mengindikasikan adanya *losses* pada sistem turbin-generator.

Tabel 7. Efisiensi Generator dan Parameter Pendukung Sebelum dan Sesudah Overhaul (14 November 2023 sampai 02 Januari 2024)

Data	Hari ke-	x (%)	h_{2s} (kJ/kg)	P_s (MW)	P_{in} (MW)	η_{gen}
Sebelum Overhaul	1	0.795	2069.20	55.75	52.96	86%
	2	0.796	2069.44	55.76	52.97	88%
	3	0.795	2067.01	56.07	53.27	87%
	4	0.795	2066.17	55.52	52.75	88%
	5	0.795	2068.91	55.82	53.03	88%
	6	0.795	2067.51	55.61	52.83	89%
	7	0.795	2068.92	54.96	52.21	89%
Sesudah Overhaul	1	0.797	2078.08	55.45	52.68	96%
	2	0.798	2080.60	56.19	53.38	95%
	3	0.797	2077.46	55.07	52.32	96%
	4	0.797	2077.18	54.88	52.13	97%
	5	0.797	2076.60	55.08	52.33	96%
	6	0.797	2076.40	55.18	52.42	96%
	7	0.797	2076.87	55.07	52.31	96%

Berdasarkan data yang disajikan pada **Tabel 7**, efisiensi aktual generator menunjukkan peningkatan yang signifikan setelah dilakukan proses *overhaul*. Sebelum *overhaul*, nilai efisiensi berkisar antara 86% hingga 89%, sedangkan setelah *overhaul* meningkat menjadi 95% hingga 97%. Peningkatan ini mencerminkan adanya perbaikan kinerja

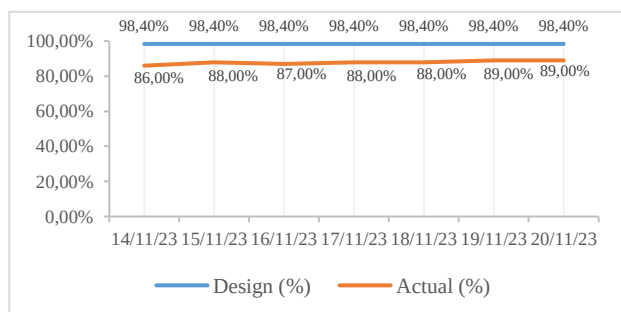
sistem secara keseluruhan, baik dari sisi efisiensi mekanis turbin maupun efektivitas konversi energi oleh generator.

Selain itu, kestabilan nilai kualitas uap (x) dan entalpi keluaran dalam kondisi isentropik (h_{2s}) setelah *overhaul* juga mengindikasikan kondisi operasi turbin yang lebih optimal dan konsisten. Hal ini memperkuat indikasi bahwa tindakan perbaikan fisik maupun penyesuaian sistem yang dilakukan selama proses *overhaul* memberikan dampak positif secara langsung terhadap efisiensi konversi energi dari uap menjadi energi listrik.

Perbandingan antara efisiensi aktual generator dengan efisiensi desain serta antara kondisi sebelum dan sesudah *overhaul* dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi seberapa dekat performa aktual mendekati efisiensi yang dirancang, serta untuk menilai efektivitas dari tindakan pemeliharaan yang telah dilakukan.

Efisiensi desain generator ditetapkan sebesar 98,4%. Berdasarkan Gambar 1, efisiensi aktual sebelum *overhaul* mengalami fluktuasi, dimulai dari 86% pada hari ke 1 tanggal 14 November 2023 dan mencapai puncaknya sebesar 89% pada 20 November 2023 di hari ke 7. Fluktuasi ini menunjukkan bahwa performa generator dapat berubah seiring waktu dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kondisi komponen, kestabilan operasional, serta beban kerja sistem.

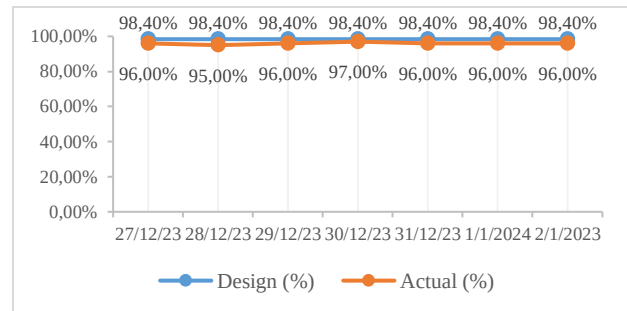
Selisih yang cukup besar antara efisiensi aktual dan efisiensi desain mengindikasikan bahwa sebelum *overhaul*, generator belum beroperasi secara optimal. Oleh karena itu, tindakan *overhaul* diperlukan sebagai langkah perbaikan menyeluruh yang terbukti mampu meningkatkan efisiensi sistem dan kinerja operasional secara signifikan.



Gambar 1. Efisiensi Generator Aktual dengan Efisiensi Desain Sebelum Overhaul

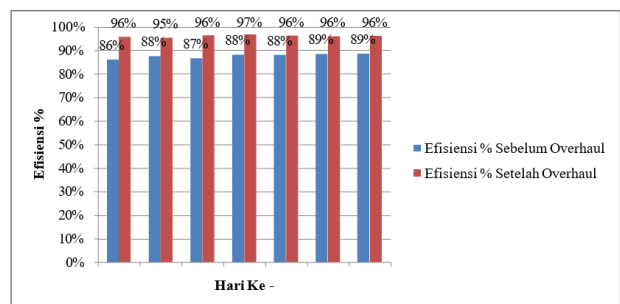
Setelah dilakukan *overhaul*, efisiensi aktual menunjukkan peningkatan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Nilai efisiensi aktual berada dalam kisaran 95% dan mencapai puncaknya sebesar 97% pada tanggal 30 Desember 2023. Peningkatan efisiensi ini menunjukkan adanya perbaikan kinerja generator dibandingkan dengan

kondisi sebelum *overhaul*. Meskipun efisiensi aktual masih belum mencapai efisiensi desain, peningkatan yang signifikan setelah *overhaul* menunjukkan dampak positif terhadap kinerja sistem serta efektivitas dari tindakan pemeliharaan yang telah dilakukan.



Gambar 2. Efisiensi Generator Aktual dengan Efisiensi Desain Setelah Overhaul

Gambar 3 menunjukkan tren peningkatan efisiensi generator sebelum dan sesudah proses *overhaul*, yang diukur selama tujuh hari berturut-turut. Efisiensi awal berkisar antara 86% hingga 88%, yang menunjukkan adanya potensi untuk peningkatan, setelah dilakukan *overhaul*, efisiensi meningkat secara konsisten menjadi antara 94% hingga 96%. Hal ini menunjukkan bahwa *overhaul* berkala dapat memberikan peningkatan signifikan terhadap efisiensi operasional.



Gambar 3. Perbandingan Efisiensi Sebelum dan Sesudah Overhaul

Pada hari pertama setelah *overhaul*, efisiensi tercatat sebesar 95% dan terus meningkat pada hari-hari berikutnya, mencapai nilai puncak sebesar 97% pada hari keempat. Peningkatan efisiensi ini menunjukkan bahwa *overhaul* berhasil meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan, meskipun masih terdapat sedikit perbedaan dari efisiensi desain ideal sebesar 98,4%. Secara keseluruhan, *overhaul* memberikan dampak positif terhadap efisiensi generator. Meskipun efisiensi aktual setelah *overhaul* belum sepenuhnya mencapai efisiensi desain, terdapat peningkatan signifikan dibandingkan dengan kondisi sebelum *overhaul*, yang menunjukkan efektivitas dari pemeliharaan dan perbaikan sistem. Dengan mengembalikan elemen-elemen tersebut ke

kondisi optimal, konversi energi termal menjadi energi listrik menjadi lebih efisien.

Berdasarkan observasi lapangan, setelah dilakukan *overhaul*, terdapat empat faktor yang secara signifikan memengaruhi kinerja generator, sebagaimana diuraikan berikut ini:

1. Bantalan Rotor yang Aus: Bantalan rotor yang aus menghambat rotasi rotor yang lancar. Untuk mengatasi hal ini, pelumasan bantalan rotor yang tepat diperlukan guna mengembalikan fungsi rotor dan memastikan operasinya berjalan dengan baik.
2. Pengaturan Arus Eksitasi Rotor yang Rendah: Arus eksitasi yang tidak mencukupi pada rotor dapat menyebabkan penurunan daya keluaran. Penyesuaian kecepatan arus eksitasi pada 3000 RPM dapat meningkatkan efisiensi sebesar 6–7%. Penelitian dengan judul Analisa Efisiensi Kinerja Generator G-101 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi menunjukkan bahwa penyesuaian rotor memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi, stabilitas, dan keandalan generator [20]. Pengelolaan kecepatan rotor dan pemeliharaan yang tepat dapat meningkatkan efisiensi generator sebesar 6–8%.
3. Perbaikan *Cooling Tower*: Kipas dinamo pada *cooling tower* diganti, yang memengaruhi kualitas air pendingin yang diarahkan ke kondensor. Kondensor memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas suhu uap dari turbin, yang secara langsung memengaruhi efisiensi generator. Kondisi setelah *overhaul*, efisiensi generator meningkat sebesar 1–2%. Penelitian dengan judul Perbandingan Efisiensi *Cooling Tower* Unit 2 PLTP Lahendong Sebelum dan Sesudah *Overhaul* juga mengonfirmasi bahwa peningkatan efisiensi setelah *overhaul* konsisten dengan referensi, menunjukkan peningkatan sebesar 1% [21].
4. Perbaikan Kondensor: Filter air pendingin pada kondensor dibersihkan sebagai bagian dari proses *overhaul*. Setelah dibersihkan, peningkatan efisiensi generator relatif kecil, berkisar antara 0,20–0,55%. Hal ini konsisten dengan hasil penelitian oleh Alber & Kiono, yang menunjukkan peningkatan efisiensi generator sebesar 0,30% hingga 0,50% setelah *overhaul* [22].

Secara keseluruhan, kinerja generator setelah *overhaul* menunjukkan tren peningkatan yang positif, ditandai dengan kenaikan efisiensi generator dan perbaikan parameter operasional sistem. Meskipun efisiensi generator setelah *overhaul* belum sepenuhnya mencapai efisiensi desain sebesar 98,4%, peningkatan efisiensi aktual hingga mencapai kisaran 95–97% menunjukkan bahwa tindakan *overhaul* memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan performa generator dan sistem pembangkitan secara keseluruhan. Hasil ini mengindikasikan bahwa

kondisi komponen mekanis, sistem eksitasi, dan sistem pendingin memiliki pengaruh penting terhadap efektivitas konversi energi pada PLTP.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Analisis hanya dilakukan pada satu unit generator dengan periode pengamatan operasional yang relatif singkat, yaitu tujuh hari sebelum dan sesudah *overhaul*, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan performa jangka panjang sistem. Selain itu, penelitian ini belum mempertimbangkan pengaruh variasi beban operasi, kondisi reservoir panas bumi, degradasi komponen internal generator, serta analisis ekonomi terkait biaya dan manfaat *overhaul* terhadap peningkatan efisiensi pembangkitan.

Implikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa evaluasi performa generator berbasis parameter operasional dan termodinamika dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan pemeliharaan preventif dan penjadwalan *overhaul* pada PLTP. Pendekatan ini juga berpotensi mendukung peningkatan keandalan operasi, efisiensi energi, dan optimalisasi pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan analisis performa jangka panjang dengan periode data yang lebih luas, melibatkan lebih banyak unit pembangkit, serta mengintegrasikan analisis termodinamika, kondisi mekanis generator, dan evaluasi ekonomi *overhaul* agar diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi generator PLTP.

PENUTUP

Simpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *overhaul* memberikan dampak positif terhadap peningkatan efisiensi generator pada PLTP Unit 1 PT. XYZ. Efisiensi aktual generator meningkat dari kisaran 86–89% sebelum *overhaul* menjadi 95–97% setelah *overhaul*, yang menunjukkan peningkatan kinerja sistem pembangkitan dan efektivitas proses pemeliharaan. Peningkatan efisiensi tersebut dipengaruhi oleh perbaikan pada beberapa komponen utama, seperti bantalan rotor, sistem eksitasi, *cooling tower*, dan kondensor.

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam evaluasi efisiensi generator PLTP menggunakan pendekatan parameter operasional dan termodinamika untuk menganalisis pengaruh *overhaul* terhadap performa sistem. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pemeliharaan preventif dan *overhaul* berkala memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi, keandalan operasi, dan optimalisasi kinerja pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Saran

Berdasarkan penelitian dan dari hasil pengujian yang telah dilakukan sebelumnya ada beberapa saran yang penulis sampaikan :

1. Perlu dilakukan perawatan untuk menjaga kondisi generator agar tetap berfungsi dengan baik, karena rugi-rugi daya terutama rugi tembaga dan rugi daya mekanis tersebut dapat mengakibatkan kinerja generator menurun, selain itu juga perlu dilakukan pengecekan secara berkala agar generator beroperasi dalam kondisi yang stabil sesuai kapasitasnya.
2. Penulis menggunakan *software* Chemical *TowerSteamTab Companion* untuk menyimulasikan perhitungan agar penulis dapat mengetahui nilai *enthalpy* dan *entropy* sehingga lebih mudah dalam melakukan perhitungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Dincer dan H. Ishaq, "Geothermal Energy-Based Hydrogen Production," dalam *Renewable Hydrogen Production*, Elsevier, 2022, hlm. 159–189. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85176-3.00003-2>
- [2] Nasruddin dkk., "Potential of geothermal energy for electricity generation in Indonesia: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, hlm. 733–740, Jan 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.032>
- [3] "content-laporan-kinerja-ditjen-ebtke-tahun-2024."
- [4] L. C. A. Gutiérrez-Negrín, "Evolution of worldwide geothermal power 2020–2023," *Geotherm Energy*, vol. 12, no. 1, hlm. 14, Mei 2024, <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00290-w>
- [5] V. A. Brilian dkk., "Technical initiatives to develop low-medium temperature geothermal resources in Indonesia: Lessons learned from the United States," *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 247, hlm. 213720, Apr 2025, <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.213720>
- [6] G. Data, "Power Generation and Cumulative Capacity of Geothermal Power Plants in Indonesia (2017–2021)," GlobalData. Diakses: 22 Juni 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.globaldata.com/data-insights/power-and-utilities/power-generation-and-cumulative-capacity-of-geothermal-power-plants-in-indonesia-2017-2021>
- [7] J. Liao dkk., "Effect of operating conditions on the output performance of a compact TEG for low-grade geothermal energy utilization," *Applied Thermal Engineering*, vol. 236, hlm. 121878, Jan 2024, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121878>
- [8] D. S. Purnomo, T. Haryono, dan Masitoh, "Derating Prediction Due to Scaling at Kamojang Geothermal Turbine Using Nozzle Blocking Ratio Calculation," dalam *2020 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, Bandung, Indonesia: IEEE, Sep 2020, hlm. 142–146. <https://doi.org/10.1109/ICT-PEP50916.2020.9249825>
- [9] R. Atlason, G. Oddsson, dan R. Unnthorsson, "Geothermal Power Plant Maintenance: Evaluating Maintenance System Needs Using Quantitative Kano Analysis," *Energies*, vol. 7, no. 7, hlm. 4169–4184, Jul 2014, <https://doi.org/10.3390/en7074169>
- [10] E. Prastyo dan I. Dhamayanthie, "Analisis Kinerja Turbin Uap Sebelum dan Setelah Proses Overhaul di PT PERTAMINA GEOTHERMAL ENERGY Area Kamojang," *J. ilm. Teknik. Kimia*, vol. 6, no. 1, hlm. 18, Jan 2022, <https://doi.org/10.32493/jitk.v6i1.14492>
- [11] J. A. Kubiak dan G. Urquiza-beltrán, "Simulation of the effect of scale deposition on a geothermal turbine," *Geothermics*, vol. 31, no. 5, hlm. 545–562, Okt 2002, [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(02\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(02)00013-5)
- [12] L. F. Drbal, P. G. Boston, dan K. L. Westra, Ed., *Power Plant Engineering*. Boston, MA: Springer US, 1996. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0427-2>
- [13] M. T. Islam dkk., "Trends and prospects of geothermal energy as an alternative source of power: A comprehensive review," *Heliyon*, vol. 8, no. 12, hlm. e11836, Des 2022, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11836>
- [14] K.-J. Lee, H.-D. Yang, S.-H. Park, S.-D. Song, B.-S. Kim, dan J.-H. Shin, "Characteristics of Mechanical and Electrical Power Transmission for Small-Scaled Wind Turbine," *WJET*, vol. 04, no. 03, hlm. 82–90, 2016, <https://doi.org/10.4236/wjet.2016.43D011>
- [15] T. Zhili, Z. Dongjiao, L. Yong, dan Y. Feng, "Modelling and control strategy of a distributed small-scale low-temperature geothermal power generation system," *IET Renewable Power Gen*, vol. 17, no. 3, hlm. 539–554, Feb 2023, <https://doi.org/10.1049/rpg2.12613>
- [16] F. U. D. Kirmani, A. Raza, R. Gholami, M. Z. Haidar, dan C. S. Fareed, "Analyzing the effect of steam quality and injection temperature on the performance of steam flooding," *Energy Geoscience*, vol. 2, no. 1, hlm. 83–86, Jan 2021, <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.11.002>
- [17] R. Rawat, R. Lamba, dan S. C. Kaushik, "Thermodynamic study of solar photovoltaic energy conversion: An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, hlm. 630–638,

Mei 2017,
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.089>

- [18] A. Bejan, "Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes," *Journal of Applied Physics*, vol. 79, no. 3, hlm. 1191–1218, Feb 1996, doi: 10.1063/1.362674.
<https://doi.org/10.1063/1.362674>
- [19] Y.A Çengel dan M.A Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach (8th ed.)*, 8 ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
<https://www.mheducation.com/highered/product/thermodynamics-an-engineering-approach-cengel.html>
- [20] Arrdy Kusumma Wijaya, Dedi Nugroho, Agus Adhi Nugroho, "Analisa Efisiensi Kinerja Generator G-101 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi," *Transistor: Jurnal Elektro dan Informatika*, vol. 4, no. 1, hlm. 43–48, 2022,
<https://dx.doi.org/10.30659/ei.4.1.43-48>
- [21] F. A. Kulo, R. N. Palilingan, dan C. A. N. Bujung, "Perbandingan Efisiensi *Cooling Tower* Unit 2 PLTP Lahendong Sebelum dan Sesudah *Overhaul*," *fista*, vol. 4, no. 1, hlm. 22–29, Apr 2023,
<https://doi.org/10.53682/fista.v4i1.239>
- [22] I. D. Alber dan B. F. T. Kiono, "Analisis Pengaruh Perubahan Pembebanan Listrik Terhadap Konsumsi Spesifik Bahan Bakar Pembangkitan, Heat Rate dan Efisiensi Pada Unit 1 PLTU Kendari-3," *J. En. Baru & Terbarukan*, vol. 3, no. 3, hlm. 179–186, Nov 2022, <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13371>